第46卷 第8期
2023年8月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 8
Aug. 2023

2 ℃温升情景下中国气象干旱特征变化

卢冬燕[1,2]， 朱秀芳[1,2,3]， 刘婷婷[1,2]， 张世喆[1,2]

（1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875；2. 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院，北京 100875；3. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室，北京 100875）

摘 要：全球变暖造成区域降水模式与蒸散量的改变，从而导致干旱特征变化，分析未来气象干旱对气候变暖的响应特点可以为全球变暖背景下干旱的预防和应对提供决策依据。利用第六次国际耦合模式比较计划的18个气候模式数据计算了标准化降水蒸散指数，基于游程理论识别干旱事件并提取了历史基准期及全球2 ℃温升情景下中国的4个干旱特征指标（干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值），进而分析了2 ℃温升情景下中国及其7个自然地区的气象干旱特征变化情况。结果表明：干旱频次在东部季风区呈南高北低的特点，平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值呈西北高、东南低的特点。在2 ℃温升情景下，干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值的全国均值分别为1.72次·a^{-1}、2.46个月、1.37和1.70，相比历史基准期分别增加了0.17次·a^{-1}、0.27个月、0.14和0.25。干旱频次、平均干旱强度和平均干旱峰值的均值在各地区均增加，平均干旱历时的均值仅在东北湿润半湿润温带地区表现为减小，4个干旱特征指标增加值最大的地区均为西北荒漠地区。

关 键 词：气象干旱；全球变暖；2 ℃温升情景；CMIP6；中国

文章编号：1000－6060(2023)08－1227－11(1227～1237)

全球变暖已成为21世纪的重大环境问题，2015年巴黎气候大会通过的《巴黎协定》指出要将本世纪全球平均气温控制在相对于工业化前升高2 ℃以内，并努力将升幅控制在1.5 ℃以内[1]。根据联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）第六次评估报告（Sixth Assessment Report，AR6），2001—2020年的全球地表气温与工业化前相比上升了约0.99 ℃[2]。在全球变暖背景下，近年来热浪、强降水、干旱等极端天气气候事件加剧，给社会、经济和人民生活造成了严重损失[3]。干旱是极端气候事件中影响范围最广、造成损失最严重的自然灾害类型之一[4]，其本质是降水不足导致的水分亏缺现象[5]，对水资源供应、农业生产、生态、能源、经济等诸多方面产生冲击。干旱通常分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱，其他类型的干旱本质上是气象干旱影响的结果[6]，因此准确监测气象干旱的发生对旱灾的防治具有重要意义。中国干旱频繁发生，旱灾损失占所有自然灾害的35%以上[7]，2006—2018年全国旱灾平均每年的直接经济损失达$8.5×10^{10}$元[8]。全球变暖造成区域降水模式与蒸散量的改变，从而导致干旱特征变化。近年来中国部分地区呈现干旱面积扩大、强度增加的趋势[9]，未来干旱对人民生活和社会经济的影响可能持续加重。因此，分析未来中国气象干旱对气候变暖的响应特点具有重大意义。

干旱监测与分析的常见做法是基于干旱指数提取干旱频次、历时、强度等干旱特征，从而定量地评估干旱影响[10]。常用的干旱指数有Palmer干旱指数（Palmer drought severity index，PDSI）[11]、标准化降水指数（Standardized precipitation index，SPI）[12]和标准化降水蒸散指数（Standardized precipitation evapotranspiration index，SPEI）[13]等。以往研究多基

收稿日期：2022-10-20； **修订日期**：2022-11-16

基金项目：国家自然科学基金面上基金项目（42077436）；国家重点研发计划项目（2019YFA0606900）资助

作者简介：卢冬燕（1999-），女，硕士生，主要从事气象灾害风险评估等方面的研究. E-mail: 202221051098@mail.bnu.edu.cn

通讯作者：朱秀芳（1982-），女，博士，教授，主要从事农业遥感及自然灾害等方面的研究. E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

于气象站点数据计算干旱指数并分析历史干旱的时空格局[14-16]，而随着国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project，CMIP)的更新，全球气候模式不断完善，已有较多研究者将其用于中国未来干旱变化的预估。例如，Su等[17]基于第五次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 5，CMIP5)数据计算SPEI和PDSI从而预测了全球变暖1.5 ℃和2.0 ℃下中国的干旱强度、干旱面积以及经济损失；Ma等[18]基于第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 6，CMIP6)数据计算SPEI并分析了未来不同排放情景下中国干旱的时空变化特征。目前，利用最新的CMIP6数据对中国未来干旱特征进行分析的研究还相对较少，且此类研究往往基于不同的气候预估情景进行分析而不关注特定的温升水平。全球2 ℃温控目标是应对气候变化的重要量化目标，而目前还鲜有基于CMIP6数据预测2 ℃温升情景下中国干旱特征的研究。综上，本文基于CMIP6历史气候模拟数据和气候预估情景数据计算SPEI，识别干旱事件并提取历史基准期及未来2 ℃温升情景下的干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度、平均干旱峰值，得到4个干旱特征的空间分布并分析2 ℃温升情景下中国气象干旱特征相对于历史时期的变化，以期为全球变暖背景下干旱灾害的预防和应对提供决策依据。

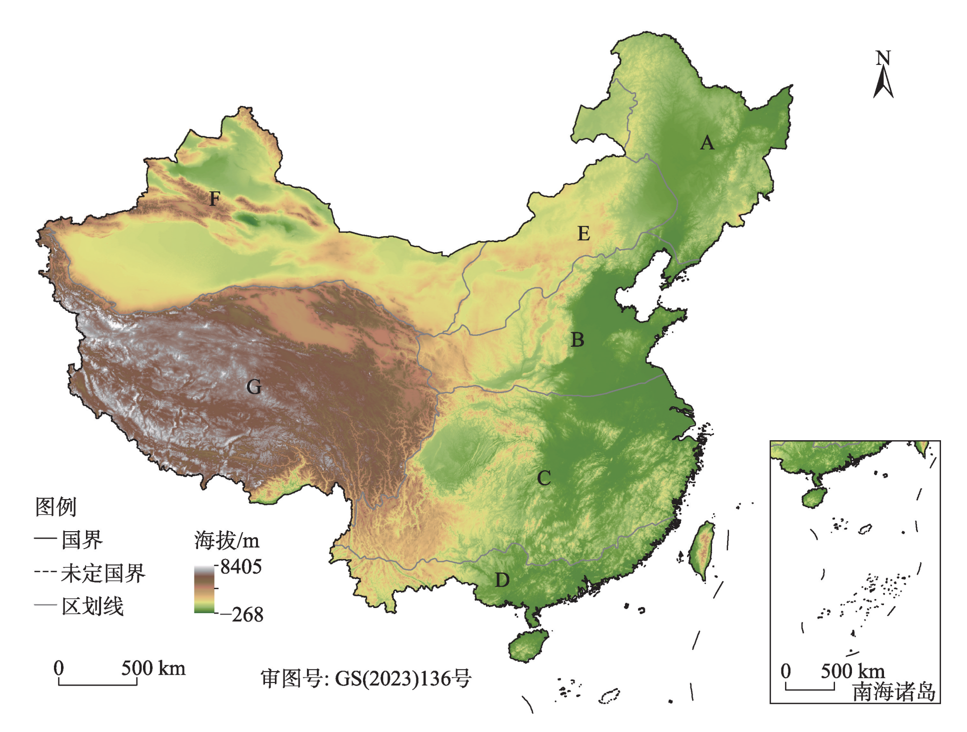
1 研究区概况

中国幅员辽阔，境内地形地势复杂，地处亚欧大陆东部，具有典型的季风气候。地形和气候的复杂性导致的水热分布不均造成中国干旱频发[19]。有研究者根据中国的地形和气候等自然条件将中国划分为7个自然地区[20]，包括东北湿润半湿润温带地区(A)、华北湿润半湿润暖温带地区(B)、华中华南湿润亚热带地区(C)、华南湿润热带地区(D)、内蒙草原地区(E)、西北荒漠地区(F)、青藏高原(G)(图1)。该区划方案在干旱相关的研究中有较多的应用[21-23]，因此本研究使用此区划方案，对比分析不同地区的干旱危险性空间分布及变化。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 CMIP6气候模式数据 CMIP6数据由世界气候研究计划提供(https://esgf-node.llnl.gov/projects/



注：图中A、B、C、D、E、F和G分别为东北湿润半湿润温带地区、华北湿润半湿润暖温带地区、华中华南湿润亚热带地区、华南湿润热带地区、内蒙草原地区、西北荒漠地区和青藏高原。下同。

图1 中国自然区划图

Fig. 1 Natural zoning map of China

cmip6/)。本研究选用1995—2100年的月尺度平均气温数据计算到达2 ℃温升水平的时间，选用1961—2100年历史和未来情景的7个气象要素（最高气温、最低气温、降水量、风速、相对湿度、地表下行短波辐射、气压）的月尺度数据计算基于Penman-Monteith的SPEI。其中，1961—2014年的数据来自CMIP6历史气候模拟试验，2015—2100年的数据来自CMIP6情景模式比较计划。情景模式比较计划旨在为未来气候变化相关研究提供数据支持，共包含8种气候预估情景，它们是不同共享社会经济路径（Shared socioeconomic pathways，SSPs）与辐射强迫水平的组合情景[24]。本研究选取了SSP1-2.6（可持续发展和低辐射强迫）、SSP2-4.5（中度发展和中辐射强迫）和SSP5-8.5（常规发展和高辐射强迫）共3种组合情景。考虑到所需气象要素的可用性，共筛选出18个符合要求的气候模式，每个气候模式包括1套历史数据集和3套组合情景数据集。各模式信息如表1所示。

2.1.2　高程数据　美国地质勘探局提供了1 km分辨率的全球DEM数据（https://yceo.yale.edu/gmted2010-global-multi-resolution-terrain-elevation-data），用于计算SPEI。

2.2　研究方法

2.2.1　全球2 ℃温升情景的确定　基于CMIP6月尺度的地表气温格点数据，采用面积加权平均方法计算各模式各组合情景逐年的全球平均地表气温。全球温升水平可通过计算30 a期间的全球平均地表气温，相对于工业化前的平均增暖数值得到，一般利用1850—1900年的数据来估算工业化前的全球平均地表气温[25]。对于每个模式的数据集，本文将IPCC AR6中提出的1995—2014年作为计算温升水平的参照期，由于这一时期的平均气温比工业化前升高了0.85 ℃[2]，则比参照期平均气温高1.15 ℃即为较工业化前增暖2 ℃。利用时间采样方法[26]，对各模式各组合情景计算30 a滑动时间窗口的气温均值，当30 a全球平均气温首次达到2 ℃温升水平时，提取这30 a数据的相关指标用于对2 ℃温升情景下的干旱特征进行分析。

2.2.2　干旱指数计算　选用1个月时间尺度的SPEI作为干旱事件识别监测的气象干旱指标，SPEI计算相对简便且考虑了气温对蒸散的影响，在中国区域的适用性较好[27]。该指数由降水量与潜在蒸散量（Potential evapotranspiration，PET）的差值构建，采用3个参数的log-logistic概率分布函数来描述其变化，

表1　18个CMIP6模式基本信息

Tab. 1　Basic information of 18 models in CMIP6

序号	模式名称	机构简称	国家	经纬向格点数
1	ACCESS-CM2	CSIRO-ARCCSS	澳大利亚	192×144
2	ACCESS-ESM1-5	CSIRO	澳大利亚	192×145
3	CanESM5	CCCma	加拿大	128×64
4	CAS-ESM2-0	CAS	中国	256×128
5	CMCC-ESM2	CMCC	意大利	288×192
6	EC-Earth3	EC-Earth-Consortium	欧盟	512×256
7	EC-Earth3-Veg	EC-Earth-Consortium	欧盟	512×256
8	EC-Earth3-Veg-LR	EC-Earth-Consortium	欧盟	320×160
9	FGOALS-g3	CAS	中国	180×80
10	FIO-ESM-2-0	FIO-QLNM	中国	288×192
11	GFDL-ESM4	NOAA-GFDL	美国	288×180
12	INM-CM4-8	INM	俄罗斯	180×120
13	INM-CM5-0	INM	俄罗斯	180×120
14	IPSL-CM6A-LR	IPSL	法国	144×143
15	MIROC6	MIROC	日本	256×128
16	MPI-ESM1-2-HR	DKRZ	德国	384×192
17	MPI-ESM1-2-LR	MPI-M	德国	192×96
18	MRI-ESM2-0	MRI	日本	320×160

再通过正态标准化处理求得,具体计算方法见国家标准《气象干旱等级》[6]。

PET和SPEI的计算使用Santiago Beguería等开发的R语言SPEI包[28]。首先将高程数据和CMIP6逐月的气象数据进行单位转换等预处理,然后按照联合国粮食及农业组织推荐的Penman-Monteith方法计算PET,最后用降水量和PET的差值计算每个模式数据集逐格点的SPEI。为确保历史和未来时期的SPEI值具有可比性,对于每个气候模式,使用1961—2014年历史时期数据计算SPEI,然后利用历史时期的拟合参数计算该模式未来3种组合情景下的SPEI[29]。

2.2.3 干旱事件识别与特征变量提取 游程理论是提取干旱指标的一种常用方法,它通过判断干旱指数的时间序列与设定阈值的关系来识别干旱事件的起止,从而得到干旱事件的历时、强度等特征变量[30]。其中,三阈值法相对于单阈值法能一定程度上提高干旱识别的准确性,本研究参照《气象干旱等级》[6]以及前人做法[18],选取0、-0.5、-1作为干旱识别的3个阈值并制定识别干旱事件的规则为:(1)当SPEI值低于-0.5时,初步认为此月发生干旱;(2)若干旱事件仅持续1个月,且该月SPEI值大于-1,则剔除此次事件;(3)若2次相邻干旱事件仅间隔1个月,且该月SPEI值小于0,则将这2次事件并为1次。

在干旱事件识别后,可得到干旱事件的总次数以及每次干旱事件的历时、强度等特征变量。本研究定义干旱频次为某段时间内的干旱事件数除以年数(次·a^{-1})。同时,计算干旱历时、干旱强度与干旱峰值3个特征变量。干旱历时为1次干旱事件的持续时间(月);干旱强度为1次干旱事件中SPEI均值的相反数;干旱峰值为1次干旱事件中SPEI最小值的相反数。

2.2.4 干旱特征计算与变化分析 提取54个未来数据集中达到2 ℃温升水平的干旱特征变量数据,然后计算每组数据30 a期间干旱频次,以及期间干旱事件的平均干旱历时、平均干旱强度、平均干旱峰值。则每组数据都得到干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度、平均干旱峰值共4个干旱特征指标并输出4张干旱特征指标的空间分布图。用于与2 ℃温升情景进行对比分析的历史基准期选定为1985—2014年,提取18个气候模式历史数据集中1985—2014年共30 a的干旱特征变量数据,计算18组数据的4个干旱特征指标并输出空间分布图。

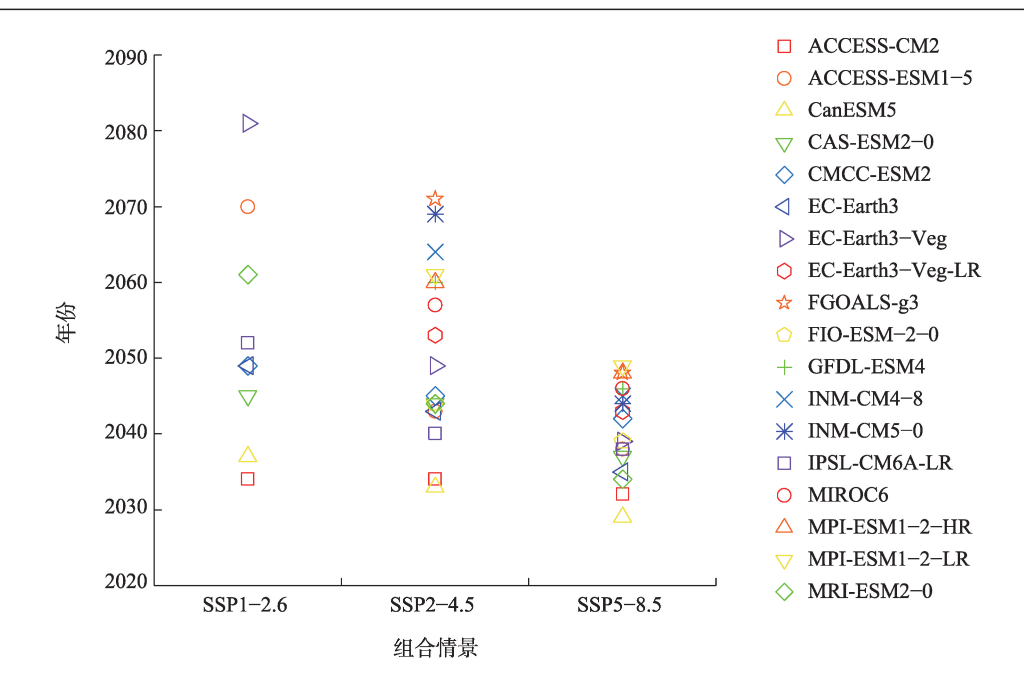
由于各气候模式具有不同的空间分辨率,使用双线性插值方法将各组数据结果图的空间分辨率重采样到0.5°×0.5°,便于对历史基准期和2 ℃温升情景下的4个指标取各组数据的集合均值,从而分别得到历史和2 ℃温升情景下4个干旱特征指标的空间分布图,并对比分析7个自然地区的气象干旱特征。将2 ℃温升情景下的干旱特征指标数值与历史数据对应作差,分析2 ℃温升情景下的气象干旱特征变化,并统计分析不同自然地区的气象干旱特征变化情况。

3 结果与分析

3.1 未来温升情景的确定结果 统计了18个模式3种组合情景数据达到2 ℃温升水平的30 a时间段,并将30 a期间的第15 a作为温升目标年份在图2中展示,2 ℃温升情景下的数据共有45组。由于SSP1-2.6为低辐射强迫情景,温升幅度相对较小,在此情景下仅有9个模式达到2 ℃温升水平,温升目标年份最早是2034年,最晚是2081年。而在中辐射强迫的SSP2-4.5组合情景和高辐射强迫的SSP5-8.5组合情景下,所有18个模式都能达到2 ℃温升水平,温升目标年份范围分别为2033—2071年和2029—2049年。

3.2 干旱频次及变化

在2 ℃温升情景下,中国干旱频次的均值为1.72次·a^{-1},最大值为1.95次·a^{-1},最小值为1.52次·a^{-1}。2 ℃温升情景下中国干旱频次的分布图(图3a)显示,整体来看,中国东部季风区的干旱频次呈现南高北低的分布规律,西北地区的干旱频次相对较高,青藏高原的干旱频次相对较低。中国7个自然地区干旱频次的箱线图(图3b)显示:2 ℃温升情景下7个自然地区中干旱频次均值最大的是F,最小的是A;全国干旱频次的最大值出现在B地区,最小值出现在G地区。与历史基准期相比,2 ℃温升情景下干旱频次的全国均值增加了0.17次·a^{-1},干旱频次增加的像元数占全国的99%以上。干旱频次变化值的分布图(图3c)显示,增大较明显的区域主要分布在F地区、G地区北部、E地区西部和东部、B地区东部,而干旱频次减小的区域主要分布在G地区



注：SSP1−2.6、SSP2−4.5、SSP5−8.5分别为可持续发展和低辐射强迫情景、中度发展和中辐射强迫情景、常规发展和高辐射强迫情景。

图2 3种组合情景下各模式到达2 ℃温升水平的年份

Fig. 2 2 ℃ warming target year of each model under 3 integrated scenarios

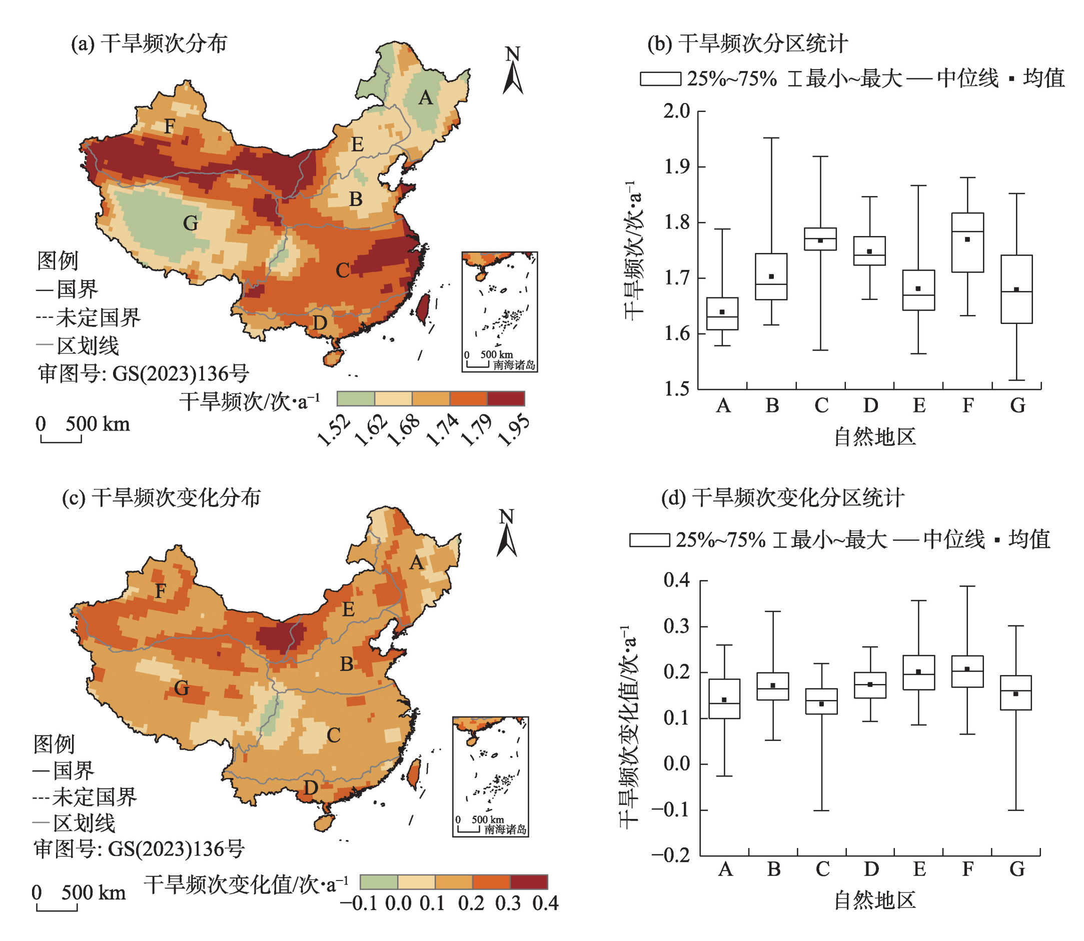


图3 2 ℃温升情景下干旱频次及其变化分布与各地区箱线图

Fig. 3 Distributions of drought frequency and its change values under the 2 ℃ temperature rise scenario with box plots for each region

东南部。由各地区干旱频次变化值的箱线图(图3d)可知:从均值来看,干旱频次增加值较大的地区为F和E,C地区的增加值最小;从最值来看,全国干旱频次变化值的最大值出现在F地区,为0.39次·a^{-1},最小值出现在C地区,为−0.10次·a^{-1}。

3.3 平均干旱历时及变化

2 ℃温升情景下平均干旱历时的全国均值为2.46个月,相较于历史基准期增加了0.27个月。由图4a~b可知,2 ℃温升情景下全国平均干旱历时总体呈西北高、东南低的空间分布规律,F、E和G地区的平均干旱历时相对较长,而A和C地区的平均干旱历时则相对较短。平均干旱历时的全国最大值出现在F地区,为3.97个月,最小值出现在A地区,为1.90个月。2 ℃温升情景下平均干旱历时相对于历史基准期的变化情况如图4c~d所示,大部分区域的平均干旱历时增加,增加较明显的区域主要分布在F地区、G地区西部和北部,而平均干旱历时减小的像元数占比不超过全国的15%,主要分布在A地区以及G地区东部。从变化值的均值来看,只有A地区为负值,其他地区均为正值,且最大的是F地区,达到了0.86个月。平均干旱历时变化值的最大值出现在F地区,为1.69个月,最小值出现在A地区,为−0.16个月。

3.4 平均干旱强度及变化

在2 ℃温升情景下,平均干旱强度的全国均值为1.37,与历史基准期相比增加了0.14。图5a显示,2 ℃温升情景下平均干旱强度较大的区域主要分布在F地区、E地区西部和东部、G地区西部和北部、B地区东北部、D地区中部,这些区域平均干旱强度的增加也较为明显。由图5c可知,平均干旱强度相对于历史基准期的变化值均为正值。从平均干旱强度及其变化值的箱线图(图5b、d)中各地区均值来看,2 ℃温升情景下平均干旱强度数值和增加值最大的地区是F,最小的地区是C。从最值来看,2 ℃

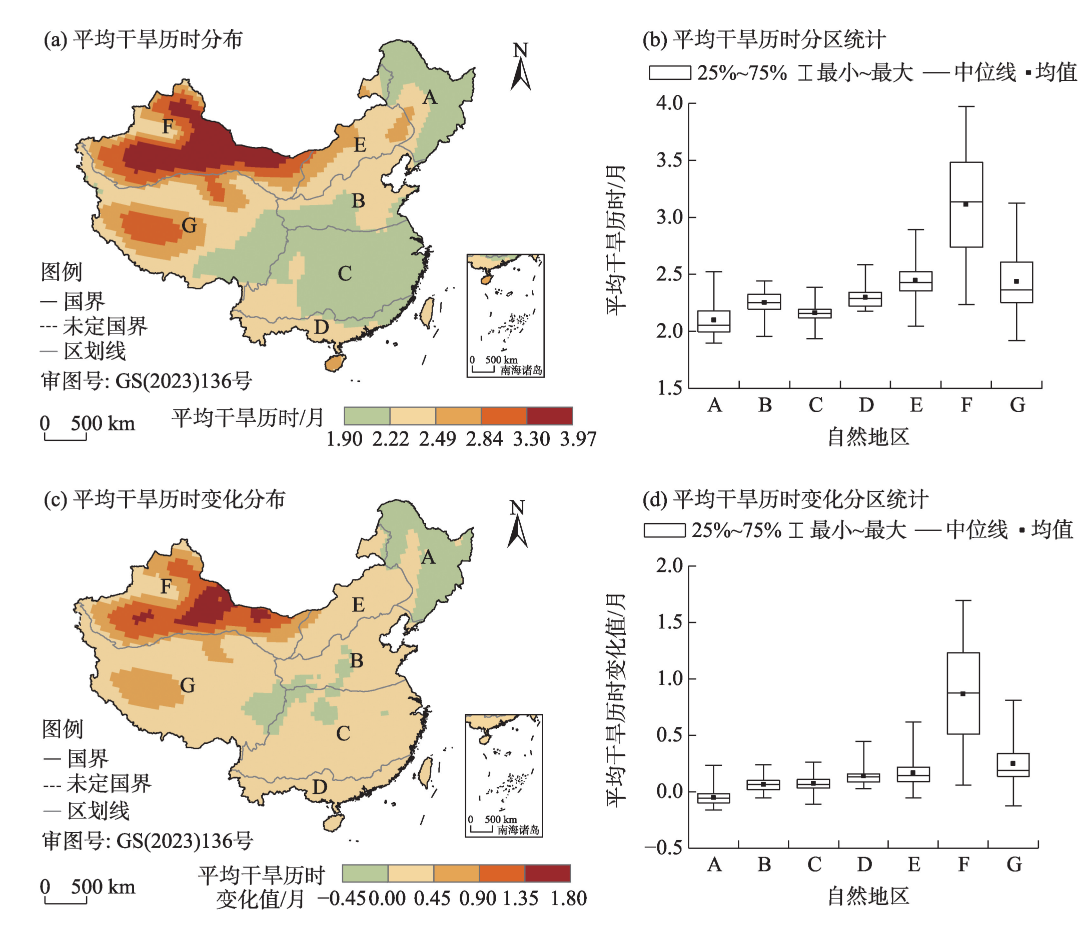


图4 2 ℃温升情景下平均干旱历时及其变化分布与各地区箱线图

Fig. 4 Distributions of drought duration and its change values under the 2 ℃ temperature rise scenario with box plots for each region

温升情景下平均干旱强度的最大值1.56和最小值1.28分别出现在F和D地区，平均干旱强度变化值的最大值0.30和最小值为0.06分别出现在F和G地区。

3.5 平均干旱峰值及变化

2 ℃温升情景下平均干旱峰值的全国均值为1.70，较历史基准期增加了0.25。平均干旱峰值及其变化值的空间分布（图6a、c）均呈现西北高、东南低的特点，平均干旱峰值全部高于1.5且其相对于历史基准期的变化值均为正值。从图6b、6d中各地区均值来看，平均干旱峰值及其增加值由高到低的排序均为：F、E、G、D、B、A、C。从极值来看，2 ℃温升情景下平均干旱峰值的最大值2.23和最小值1.52分别出现在F和C地区，平均干旱峰值变化值的最大值0.68和最小值为0.08分别出现在F和G地区。

4 讨 论

在已有文献中，不同研究者基于CMIP6气候模式数据分析得到的未来中国气象干旱特征变化规律并不完全一致。例如，Xu等[31]选取了8个分辨率小于100 km的气候模式，基于SPI识别干旱事件，发现2061—2100年中国整体上干旱历时增加、严重程度加剧且受影响面积扩大；Song等[32]使用了9个模式的降水量数据计算SPI，从而分析了2015—2100年中国干旱特征的变化，结果显示，南方干旱事件频次增加，未来中国干旱事件历时更短、受影响面积更小但强度更高；Ma等[18]基于27个模式的降水量和气温数据计算SPEI，评估了2015—2099年中国干旱特征的变化，研究发现，在中低排放情景下，干旱事件频次增加但历时和强度减弱，在中高排放情景下，干旱历时和强度增加。前人的研究主要关注未来特定时期的干旱特征，而本研究则着眼于2 ℃温升情景下的干旱特征，结果表明未来中国的干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值的变化整体上均增加，这与已有文献中某些干旱特征指标值出现减小的结果并不一致。造成结果

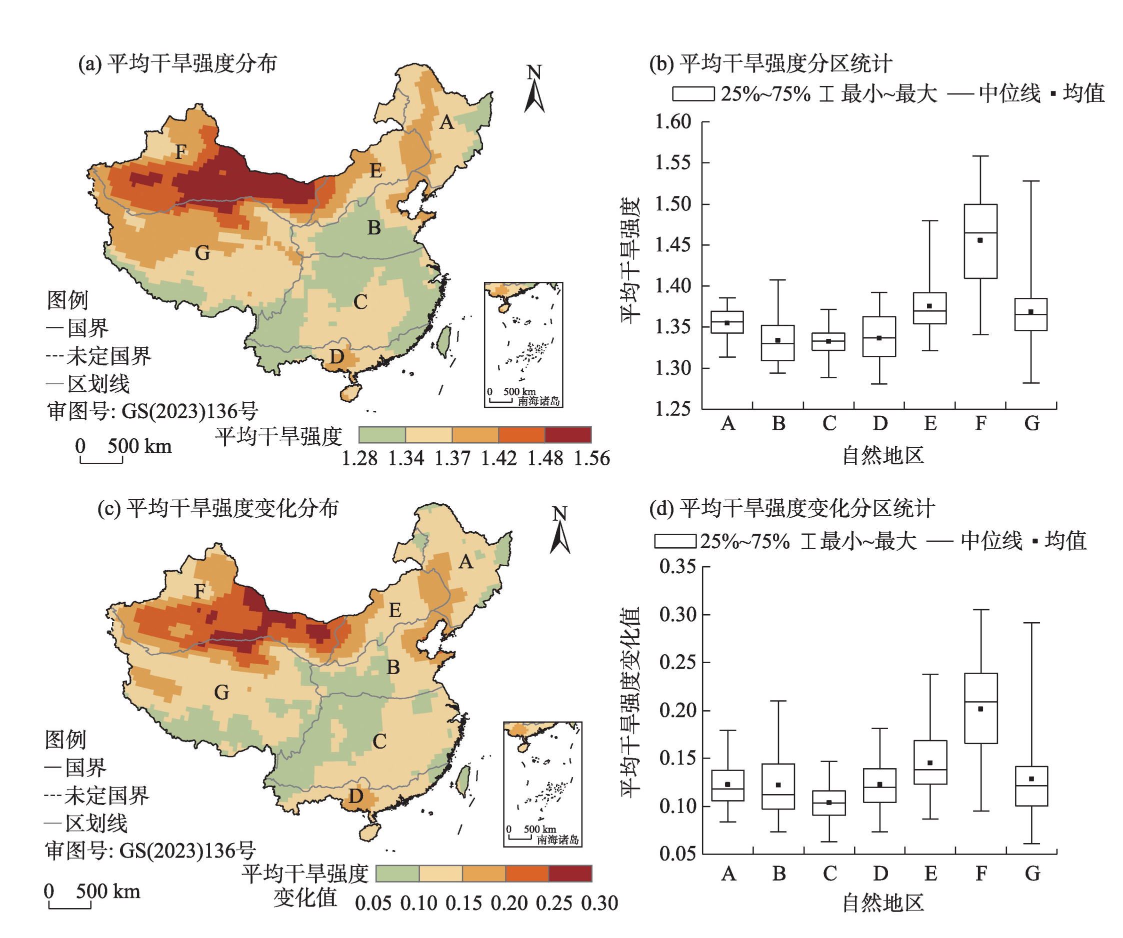


图5 2 ℃温升情景下平均干旱强度及其变化分布与各地区箱线图

Fig. 5 Distributions of drought intensity and its change values under the 2 ℃ temperature rise scenario with box plots for each region

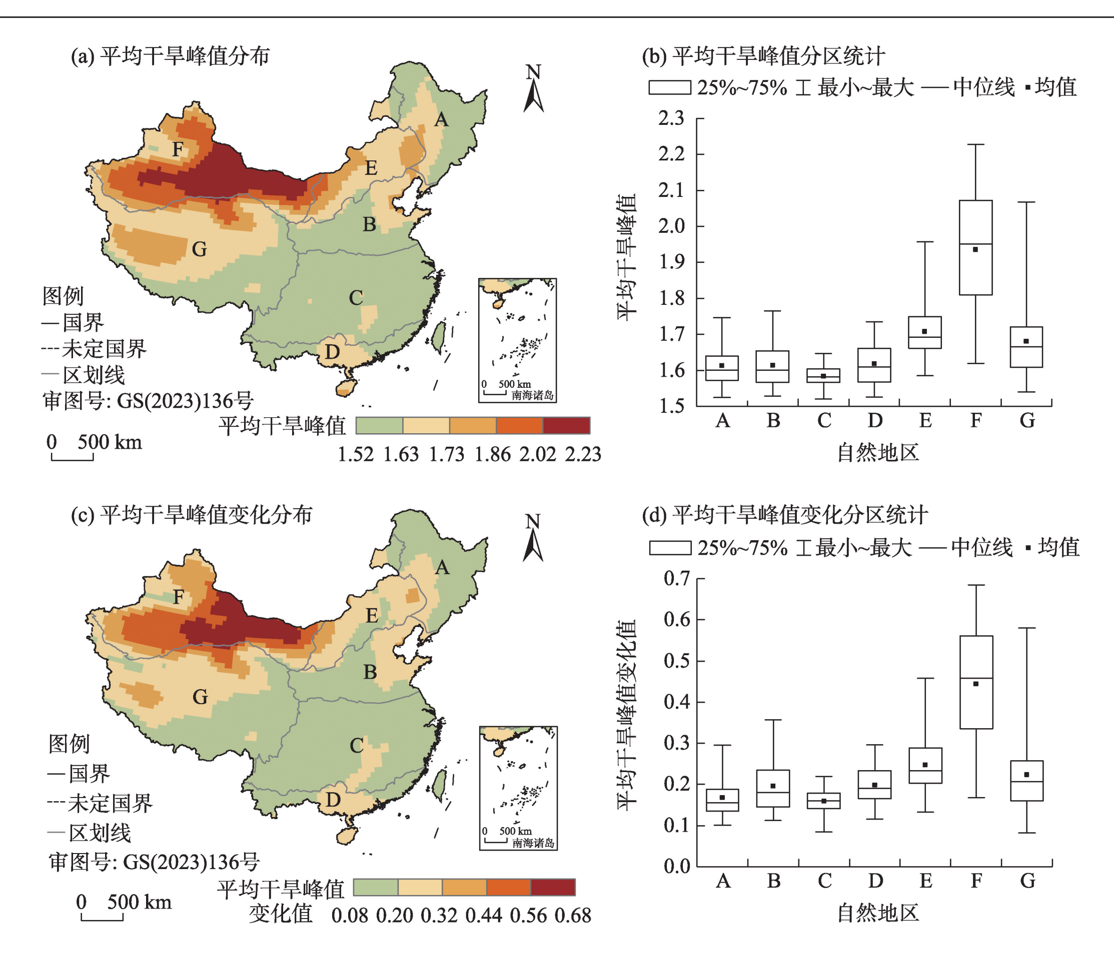


图6 2 ℃温升情景下平均干旱峰值及其变化分布与各地区箱线图

Fig. 6 Distributions of drought peak and its change values under the 2 ℃ temperature rise scenario with box plots for each region

有所差异的原因首先是数据的不同,各气候模式性能的差异使得基于不同的模式数据进行分析可能得到不同的结果;此外,干旱指数计算、干旱事件识别等干旱评估方法的不同也会造成结果的差异。

近年来中国西北地区的气候暖湿化现象[33-34]以及气候模式数据预测中国各地区降水量的增加[35-36]似乎与本研究得到的中国整体干旱加剧的结论相矛盾。但也有一些基于CMIP模式数据的研究表明,未来中国大部分地区将发生更频繁和严重的干旱,尤其是西北地区干旱明显加剧[18,23,29],与本研究结果基本一致。本研究结果有一定的合理性:一方面,干旱受降水量均值和变率的影响[37],在分析干旱变化时只考虑降水量均值的增加是片面的,气候变化背景下降水变率的增大可能使干旱加剧;另一方面,气温升高导致的蒸散量增加对干旱的影响不可忽略,这可能是西北地区干旱加剧的主要原因[23]。然而,由于气候变化的复杂性,仅根据气候模式数据计算得到的结果具有局限性,未来中国气候是否趋于暖干化存在很大不确定性。

本研究还存在一些不足之处。在数据选取方面,本研究选用了SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 3种常用的气候预估情景,但由于未来气候变化情况具有较大的不确定性,只选用3种预估情景可能没有足够的代表性,今后可以进一步将更多预估情景纳入研究,为未来干旱灾害防控提供更全面的信息。此外,本研究根据计算SPEI所需变量的可用性选取了所有符合条件的气候模式数据,而未对数据的模拟能力进行评估。随着模式物理过程的完善,CMIP6模式的模拟性能相对于CMIP5有所改进,但模式对未来气候的预估仍存在不确定性[31],本研究中各模式达到2 ℃增暖的时间差异便表现出较大的不确定性。因此,本研究采用多模式等权重集合算术平均方案以减小结果的不确定性,未来可根据各模式性能分配不同的权重系数进行集合平均分析,进一步提高结果的精度。在干旱指数选取方面,本研究使用了SPEI,但有研究指出该指数计算时使用的PET在干旱半干旱地区可能远高于实际蒸散量和降水量[22],从而使干旱严重程度被高估,因此未

来考虑同时利用多种干旱指数进行比较分析。

5 结 论

本文基于CMIP6数据计算SPEI干旱指数并提取了历史基准期以及2 ℃温升情景下的4个干旱特征指标(干旱频次、平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值),对比分析了2 ℃温升情景下中国气象干旱特征的变化,主要结论如下:

(1) 在2 ℃温升情景下,干旱频次的全国均值为1.72次·a^{-1},F地区的均值最大,中国东部季风区的干旱频次呈南高北低的特点。平均干旱历时、平均干旱强度和平均干旱峰值的全国均值分别为2.46个月、1.37和1.70,空间分布整体上均呈西北高、东南低的特点。

(2) 从全国来看,2 ℃温升情景下4个干旱特征指标的全国均值相对于历史基准期均增加。干旱频次的全国均值增加了0.17次·a^{-1},全国超过99%格点的干旱频次增加,干旱频次减小的区域主要分布在G地区东南部。平均干旱历时的全国均值增加了0.27个月,平均干旱历时减小的格点数占比不超过全国的15%,主要分布在A地区以及G地区东部。平均干旱强度、平均干旱峰值的全国均值分别增加了0.14和0.25,所有格点的变化值均为正值。

(3) 分地区来看,4个干旱特征指标变化值的均值最大的地区均为F地区,表明该地区在2 ℃温升情景下干旱加剧最为明显。干旱频次、平均干旱强度和平均干旱峰值的变化值在各地区均值均为正值,且增加值最小的地区均为C地区。平均干旱历时的地区均值则在A地区表现为减小,在其他自然地区均为增加。

参考文献(References)

[1] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, et al. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 ℃[J]. Nature, 2016, 534(7609): 631-639.

[2] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.

[3] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63. [Zhai Panmao, Liu Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. Strategic Study of CAE, 2012, 14(9): 55-63.]

[4] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 182-193. [Yin Han, Li Yaohui. Summary of advance on drought study in southwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(1): 182-193.]

[5] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1835-1848.]

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20481-2017. 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 20481-2017. Grades of meteorological drought[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]

[7] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508. [Wang Jinsong, Li Yaohui, Wang Runyuan, et al. Preliminary analysis on the demand and review of progress in the field of meteorological drought research[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4): 497-508.]

[8] 中国水旱灾害防御公报编写组.《中国水旱灾害防御公报2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 26-32. [Compilation group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2020[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 26-32.]

[9] Yu M, Li Q, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951—2010?[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 545-558.

[10] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723. [Li Yiping, Li Yaohui. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723.]

[11] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.

[12] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993: 179-183.

[13] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.

[14] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于SPEI的西南地区近53 a干旱时空特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(6): 1003-1016. [Wang Dong, Zhang Bo, An Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in southwest China over the past 53 years based

on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(6): 1003-1016.]

[15] 廖要明, 张存杰. 基于MCI的中国干旱时空分布及灾情变化特征[J]. 气象, 2017, 43(11): 1402-1409. [Liao Yaoming, Zhang Cunjie. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index[J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(11): 1402-1409.]

[16] 费振宇, 孙宏巍, 金菊良, 等. 近50年中国气象干旱危险性的时空格局探讨[J]. 水电能源科学, 2014, 32(12): 5-10. [Fei Zhenyu, Sun Hongwei, Jin Juliang, et al. Temporal and spatial patterns of meteorological drought hazard in China for recent 50 years[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(12): 5-10.]

[17] Su B, Huang J, Fischer T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 ℃ and 2.0 ℃ warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(42): 10600-10605.

[18] Ma Z, Sun P, Zhang Q, et al. The characteristics and evaluation of future droughts across China through the CMIP6 multi-model ensemble[J]. Remote sensing (Basel, Switzerland), 2022, 14(1097): 1097, doi: 10.3390/rs14051097.

[19] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991. [Yuan Wenping, Zhou Guangsheng. Theoretical study and research prospect on drought indices[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6): 982-991.]

[20] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案[J]. 地理学报, 1983(1): 1-10. [Zhao Songqiao. A new scheme for comprehensive physical regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1983(1): 1-10.]

[21] Ayantobo O O, Li Y, Song S, et al. Probabilistic modelling of drought events in China via 2-dimensional joint Copula[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 373-391.

[22] Zhang G, Su X, Singh V P, et al. Appraising standardized moisture anomaly index (SZI) in drought projection across China under CMIP6 forcing scenarios[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2021, 37: 100898, doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100898.

[23] Yao N, Li L, Feng P, et al. Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135245, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135245.

[24] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525. [Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519-525.]

[25] IPCC. Global warming of 1.5 ℃: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 ℃ above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[26] James R, Washington R, Schleussner C, et al. Characterizing half-a-degree difference: A review of methods for identifying regional climate responses to global warming targets[J]. WIREs Climate Change, 2017, 8(2): e457, doi: 10.1002/wcc.457.

[27] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 423-431. [Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 423-431.]

[28] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10): 3001-3023.

[29] Su B, Huang J, Mondal S K, et al. Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China[J]. Atmospheric Research, 2021, 250: 105375, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105375.

[30] 张世喆, 朱秀芳, 刘婷婷, 等. 基于多维Copula的中国干旱特征及危险性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 333-345. [Zhang Shizhe, Zhu Xiufang, Liu Tingting, et al. Drought characteristics and risk hazard in China based on multidimensional Copula model [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 333-345.]

[31] Xu Y, Zhang X, Hao Z, et al. Projections of future meteorological droughts in China under CMIP6 from a three-dimensional perspective[J]. Agricultural Water Management, 2021, 252: 106849, doi: 10.1016/j.agwat.2021.106849.

[32] Song Z, Xia J, She D, et al. Assessment of meteorological drought change in the 21st century based on CMIP6 multi-model ensemble projections over mainland China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126643, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126643.

[33] 姜萍, 丁文广, 肖静, 等. 新疆植被NPP及其对气候变化响应的海拔分异[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 849-857. [Jiang Ping, Ding Wenguang, Xiao Jing, et al. Altitudinal difference of vegetation NPP and its response to climate change in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 849-857.]

[34] 姚旭阳, 张明军, 张宇, 等. 中国西北地区气候转型的新认识[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 671-683. [Yao Xuyang, Zhang Mingjun, Zhang Yu, et al. New insights into climate transition in northwest China[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(3): 671-683.]

[35] Chen L, Frauenfeld O W. A comprehensive evaluation of precipitation simulations over China based on CMIP5 multimodel ensemble projections[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(10): 5767-5786.

[36] Tian J, Zhang Z, Ahmed Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(4): 831-848.

[37] Ukkola A M, De Kauwe M G, Roderick M L, et al. Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(11): e2020GL087820, doi: 10.1029/2020GL087820.

Changes in meteorological drought characteristics in China under the 2 ℃ temperature rise scenario

LU Dongyan[1,2], ZHU Xiufang[1,2,3], LIU Tingting[1,2], ZHANG Shizhe[1,2]

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Drought is one of the most widespread and destructive natural hazards, causing severe impacts on agriculture, energy, society, and ecology. Global warming results in changes in regional precipitation and evapotranspiration patterns, leading to changes in drought characteristics. China is drought prone and is also seriously affected by climate change. Therefore, it is necessary to analyze the characteristics of future meteorological drought response to climate warming in China. In this study, using historical climate simulation data and future projection data from 18 climate models of the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6), the 2 ℃ temperature rise scenario was determined by applying a time sampling approach, and the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) based on the Penman-Monteith method was calculated at a 1-month time scale as the meteorological drought monitoring index. Based on SPEI, drought events were identified using the three-threshold run theory, and four drought-characteristic indicators (drought frequency, average drought duration, average drought intensity, and average drought peak) were extracted for China under the historical reference period and the 2 ℃ temperature rise scenario. Finally, changes in meteorological drought characteristics in China and its seven natural regions were analyzed under the 2 ℃ temperature rise scenario using the future drought-characteristic indicator values minus those of the historical drought-characteristic indicators. The results show clear spatial differentiation patterns in the four drought-characteristic indicators under the 2 ℃ temperature rise scenario. Drought frequency is high in the northwest desert region of China, and is high in the south and low in the north of the eastern monsoon region, while average drought duration, intensity, and peak values are high in the northwest and low in the southeast. From a national perspective, average future values of drought frequency, average drought duration, average drought intensity, and average drought peak are 1.72 times·a^{-1}, 2.46 months, 1.37, and 1.70 respectively under the 2 ℃ temperature rise scenario, representing increases of 0.17 times·a^{-1}, 0.27 months, 0.14, and 0.25, respectively, compared with the historical reference period. From a regional perspective, the average values of drought frequency, average drought intensity, and average drought peak increase in all regions, while the average value of average drought duration shows a decrease only in the northeast humid/semi-humid temperate region. The region with the largest increases in values of the four drought-characteristic indicators is the northwest desert region. In summary, based on the results of the multi-model ensemble mean from the 18 CMIP6 models, we predict that more frequent and severe droughts will occur in China, and especially in northwest China, under the 2 ℃ temperature rise scenario. This prediction can serve as a warning in terms of future drought management, and the study can provide a basis for drought prevention and response decision-making in the global warming context.

Key words: meteorological drought; global warming; 2 ℃ temperature rise scenario; CMIP6; China